



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**SPOLUPRACUJÍCÍ ROBOTY**

COLLABORATIVE ROBOTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

David Čefelín

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

**BRNO 2018**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **David Čefelín**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Spolupracující roboty

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešeršní práce, která je zaměřena na velmi módní oblast nasazení průmyslových robotů. Práce má za cíl popsat problematiku kolaborativních robotů a jejich užití v praxi.

### Cíle bakalářské práce:

- popis současného stavu kolaborativní robotiky
- popis možného nasazení kolaborativních robotů
- případová studie

### Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-23957-4

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie: 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-802-1448-285

NOF, Shimon Y. Handbook of industrial robotics: 1. 2nd ed. New York: John Wiley, c1999. ISBN 978-047-1177-838

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce shrnuje poznatky z oblasti kolaborativní robotiky. Rešeršní část se zabývá bezpečností při práci se spolupracujícími roboty, programováním a využitím kolaborativních robotů v praxi. Dále jsou představeny nejznámější kolaborativní roboty a jejich nejdůležitější parametry. V praktické části je na jednoduchém příkladu ukázán způsob off-line programování s jednotlivými kroky při tvorbě programu.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis summarizes the knowledge from the field of collaborative robotics. The research part deals with cooperation with collaborating robots, programming and using the collaborative robots in practice. In addition, the most well-known collaborative robots and their most important parameters are presented. In the practical part, the simple example of off-line programming with individual is shown.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Robotika, kolaborativní robot, kolaborativita, bezpečnost, kobot

## **KEYWORDS**

Robotics, collaborative robot, collaboration, safety, cobot



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČEFELÍN, D. Spolupracující roboty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D.





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21.května 2018

.....

Čefelín David



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za jeho pomoc při vedení a cenné rady během zpracování bakalářské práce. Děkuji také mé rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PRŮMYSLOVÉ ROBOTY .....</b>	<b>17</b>
2.1	Historie.....	17
2.2	Průmyslové vs. spolupracující roboty .....	18
<b>3</b>	<b>BEZPEČNOST SPOLUPRACUJÍCÍCH ROBOTŮ .....</b>	<b>21</b>
3.1	Technická specifikace ISO/TS 15066.....	21
3.2	Bezpečnostní monitorované zastavení .....	21
3.3	Ruční navádění .....	21
3.4	Sledování rychlosti a vzdálenosti .....	22
3.5	Omezení síly a výkonu .....	23
<b>4</b>	<b>PROGRAMOVÁNÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ .....</b>	<b>25</b>
4.1	On-line programování.....	25
4.1.1	Metoda Teach-in.....	25
4.1.2	Metoda Play-back .....	25
4.2	Off-line programování .....	25
<b>5</b>	<b>PŘEHLED NEJZNÁMĚJŠÍCH KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ .....</b>	<b>27</b>
5.1	Parametry průmyslových robotů.....	27
5.2	YuMi.....	28
5.3	Sawyer a Baxter .....	28
5.4	Universal Robots.....	29
5.5	Roboty Kuka .....	30
5.6	Aura .....	30
5.7	Roboty Fanuc .....	31
<b>6</b>	<b>VYUŽITÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ.....</b>	<b>33</b>
6.1	Uplatnění rychlosti.....	33
6.2	Uplatnění přesnosti a opakovatelnosti .....	34
6.3	Uplatnění užitečného zatížení .....	34
6.4	Uplatnění specifické síly .....	35
6.5	Uplatnění více předností .....	35
<b>7</b>	<b>PŘÍPADOVÁ STUDIE .....</b>	<b>37</b>
7.1	Výběr vhodného robotu .....	37
7.2	Tvorba pracoviště .....	37
7.3	Přizpůsobení koncového efektoru.....	38
7.4	Nastavení SC.....	38
7.5	Tvorba signálů v řídicím systému.....	39
7.6	Tvorba pracovních cest .....	40
7.7	Vytvoření simulace .....	40
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>49</b>
10.1	Seznam obrázků.....	49
10.2	Seznam tabulek .....	49



# 1 ÚVOD

Kolaborativní robotika je atraktivní způsob uplatňování průmyslových robotů. Vzhledem k stále většímu uplatňování spolupracujících robotů v praxi, dochází v posledních letech k nárůstu jejich prodeje. Důvodem vysokého zájmu o nasazování těchto robotů do výroby je i nízká nezaměstnanost, a tudíž nedostatek lidské pracovní síly.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část je zaměřena na všeobecnou teorii ohledně kolaborativních robotů. Definuje pojem kolaborativní robot, jeho výhody a nevýhody oproti obyčejným průmyslovým robotům. Podrobněji je popsána bezpečnost při sdílení pracovního prostoru člověka se spolupracujícími roboty, související s normou ISO/TS 15066, která je jedním z nejdůležitějších dokumentů v oblasti bezpečnosti robotů. Představeny jsou metody programování kolaborativních robotů a jejich výhody oproti programování klasických průmyslových robotů. Také je zde uveden přehled nejznámějších kolaborativních robotů s jejich nejdůležitějšími parametry. Závěr teoretické části je věnován možnému uplatnění těchto robotů v praxi.

Praktická část ve formě případové studie se zabývá programováním kolaborativního robotu na jednoduchém příkladu. Výsledkem této studie je názorná simulace vytvořená v programu RobotStudio.





## 2 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY

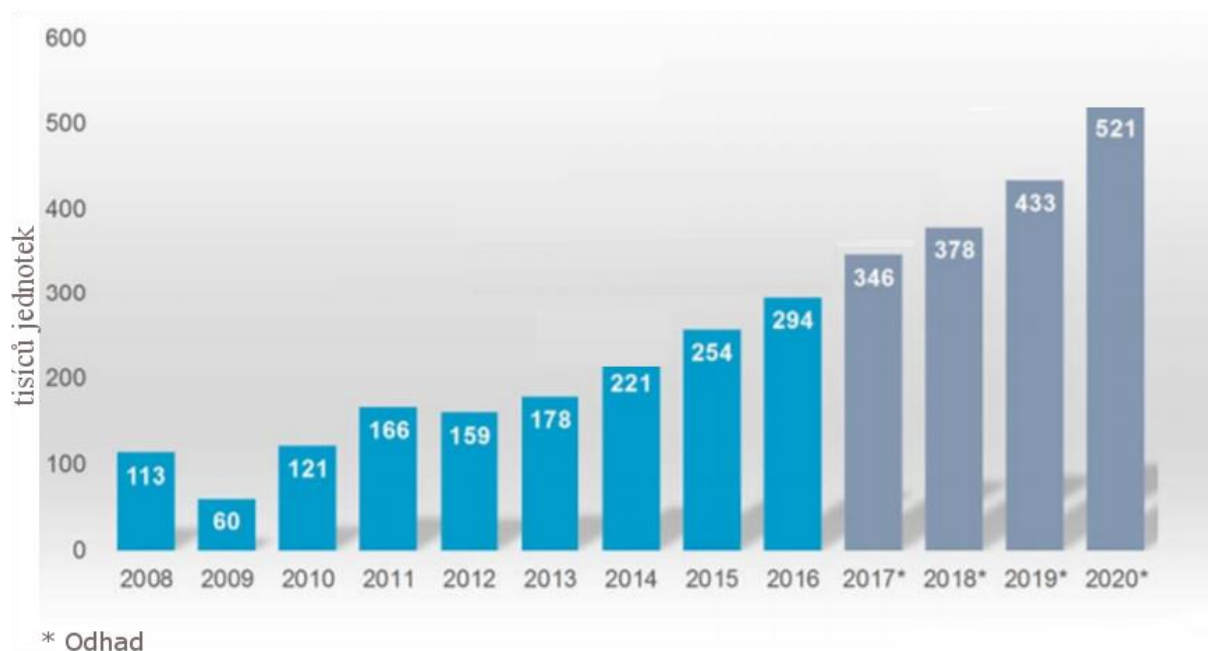
### 2.1 Historie

Za zakladatele průmyslových robotů je považován George Devol, který si roku 1954 nechal patentovat první programovatelný stroj. O několik let později spolu s Josephem Engelbergerem založili první společnost vyrábějící roboty s názvem Unimation. Jedním z prvních zákazníků jejich firmy byla společnost General Motors, která roboty nasadila za účelem přidržování a svařování automobilových karoserií. Od té doby bylo zakládáno mnoho firem zabývajících se výrobou robotů, které tím položily základy dnešní průmyslové robotiky. [1]

Do konce 70. let 20. století byly velké a těžké roboty využívány především pro bodové svařování a manipulaci s těžkými součástmi v automobilkách. V roce 1978 byl představen převratný robot SCARA, který byl navržen především k montáži menších součástek a způsobil tak světový vzestup v oblasti elektrotechniky. Požadavky na rychlost a hmotnost robotů vedly k rozvoji tzv. robotů s paralelní strukturou v 90. letech. V roce 2005 začal výzkum na dánské univerzitě, který měl za cíl vytvořit nový flexibilní a uživatelsky přívětivý robot [1]. Výsledkem tříletého výzkumu byl první kolaborativní robot UR5 od společnosti Universal Robots.

S rostoucím pokrokem a mírou automatizace a z důvodu nahradit lidské pracovníky při vyčerpávající a nebezpečné práci si průmyslové roboty našly uplatnění v celé škále odvětví jako např. svařování, lakování, paletizace apod. [1]

Statistiku prodaných průmyslových robotů z let 2008 až 2016 a odhady do roku 2020 podle IFR (International Federation of Robotics) lze vidět na obrázku č.1



Obr. 1) Počet celosvětově prodaných průmyslových robotů [2]

## 2.2 Průmyslové vs. spolupracující roboty

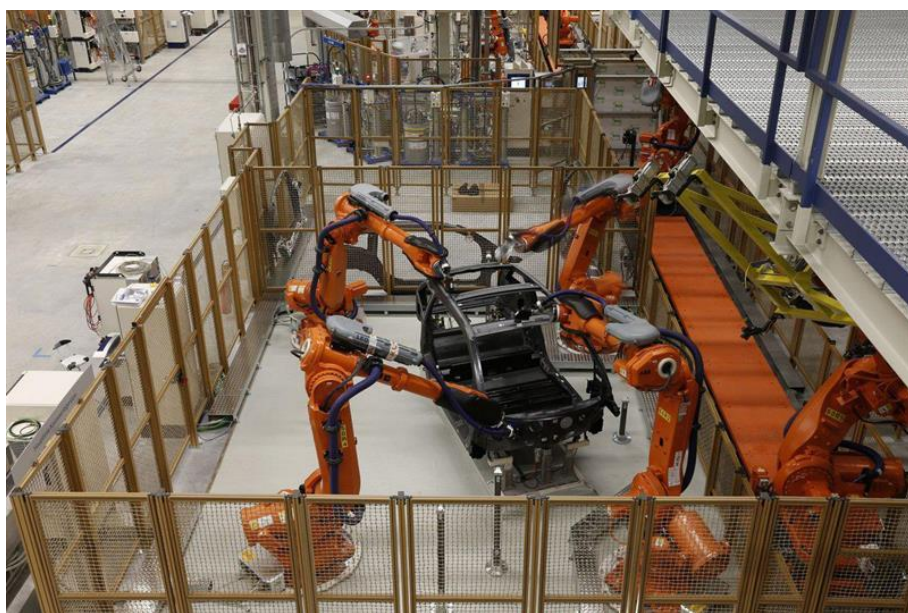
### Průmyslový robot

Průmyslový robot je podle normy ISO 8373 definován jako: „Automaticky řízený, opakované programovatelný, víceúčelový manipulátor programovatelný ve třech nebo více osách, které mohou být buď fixované na místě nebo mobilní pro použití v průmyslových automatických aplikacích.“ [3]

Průmyslové roboty jsou jen jedním ze základních kamenů průmyslové výroby. Dnešní roboty jsou výsledkem požadavků kladených na velkovýrobu především v oblasti automobilového a elektrotechnického průmyslu.

Hlavními přednostmi tradičních průmyslových robotů je jejich schopnost pracovat s velkým užitečným zatížením a poměrně rychle vykonat požadovanou operaci. Tyto stroje ovšem trvá dlouho přeprogramovat na jinou operaci a samotné programování vyžaduje kvalifikovaného technika či programátora. Další nevýhodou je nebezpečí, které vzniká v bezprostřední blízkosti robotu, protože robot manipuluje s velkým zatížením. Z tohoto důvodu je tradiční průmyslový robot většinou umístěn v bezpečnostní kleci [4].

Běžný průmyslový robot je kloubový většinou s 6 stupni volnosti. Toto uspořádání umožňuje velkou flexibilitu robotu, která se následně uplatňuje při bodovém i obloukovém svařování, při manipulaci s materiálem a v mnoha dalších aplikacích [5].



Obr. 2) Průmyslový robot v ochranné kleci [6]

### Spolupracující robot

Spolupracující, častěji označovaný jako kolaborativní robot (zkráceně kobot) je automatický nebo počítačem řízený stroj, který patří do skupiny průmyslových robotů. Slovo kolaborativní je odvozeno od anglického „collaborativity“ což znamená spolupráce.

Na rozdíl od klasických robotů nejsou kolaborativní vybaveny ochrannými klecemi a při práci sdílí pracovní prostor s lidskou obsluhou a jejich primárním úkolem je podporovat

člověka a oprostít ho od namáhavé často monotónní práce během pracovního procesu a zajistit vysokou přesnost a produktivitu i při velkém počtu opakujících se operací [7]. Kolaborativní robot je tedy v porovnání s klasickým průmyslovým robotem, který by konal stejný úkol, výrazně menší, jelikož nepotřebuje ochrannou klec. Z tohoto důvodu jsou kolaborativní roboty obecně flexibilnější a mobilnější ovšem na úkor některých dalších parametrů plynoucích z bezpečnostních důvodů.

Tab. 1) Porovnání tradičního průmyslového a spolupracujícího robotu [8]

<b>Vlastnost</b>	<b>Průmyslový robot</b>	<b>Kolaborativní robot</b>
Instalace	fixní	flexibilní
Požadavky na kvalifikaci obsluhy	vysoké	nízké
Pracovní prostor	oddělený	sdílený
Interakce s lidmi	nechtěná (nebezpečná)	běžná (bezpečná)
Maximální zatížení	velké	malé
Maximální rychlost	velká	malá
Nutnost posouzení rizika kolize s obsluhou	ne	ano
Dosah	až 6 m	cca jako člověk
Maximální zatížení	až 2300 kg	až 110 kg



## 3 BEZPEČNOST SPOLUPRACUJÍCÍCH ROBOTŮ

### 3.1 Technická specifikace ISO/TS 15066

Jak je z definice kolaborativního robotu zřejmé, dochází při spolupráci člověka a kolaborativního robotu k bezprostřednímu kontaktu, z tohoto důvodu je tedy nutné jasně specifikovat požadavky na konstrukci kolaborativních robotů. Jelikož normy ISO 10218-1 a ISO 10218-2, které se zabývají bezpečností průmyslových robotů, publikovány poprvé již v roce 2006, tedy v roce, kdy obor průmyslových kolaborativních robotů ještě v podstatě neexistoval, obsahovaly pouze jednu stranu věnovanou kolaborativní robotice, bylo s jejím rozvojem nutné vydat další doporučení a soubor informací pro konstruktéry robotů a robotizovaných pracovišť [9]. Tímto souborem je 30 stránková technická specifikace s označením ISO/TS 15066.

Tato norma je základním souborem nařízení a doporučení pro návrhy robotizovaných pracovišť zapojujících kolaborativní roboty do provozu. Hlavní myšlenkou je to, že pokud už dojde ke kontaktu člověka s robotem, nesmí tento kontakt způsobit bolest. V této normě jsou uvedeny maximální přípustné hodnoty nárazové síly (tlaku) na jednotlivé části lidského těla, které robot nesmí za žádných podmínek překročit. Tyto hodnoty jsou někdy označovány jako „úroveň bolesti na počátku bolesti“ nebo „prahová úroveň bolesti“ a byly získány výzkumem na 100 subjektech na univerzitě v Mohuči [10]. Dále jsou v této normě uvedeny 4 způsoby (módy) spolupráce mezi kolaborativním robotem a člověkem, ze kterých musí kolaborativní robot alespoň jeden splňovat. Tyto módy jsou: bezpečnostní monitorované zastavení, ruční navádění, sledování rychlosti a vzdálenosti a omezení síly a výkonu [11].

### 3.2 Bezpečnostní monitorované zastavení

Jedná se o zabezpečení, které se využívá většinou u robotů, které pracují převážně samostatně. Nicméně pokud dojde ke vstupu pracovníka do monitorované oblasti např. z důvodu údržby nebo obsluhy, robot se sám zastaví [11]. Tento monitorovaný prostor musí být dostatečně velký, aby bylo možné zajistit zastavení robotu ještě před kontaktem s člověkem, po zastavení může obsluha provést potřebné operace jako např. výměnu nástroje či materiálu nebo odebrání hotového výrobku. Po vykonání těchto úkonů a opuštění monitorovaného prostoru se robot automaticky vrátí k činnosti, kterou vykonával před zastavením [12]. Z principu této metody je tedy zřejmé, že robot pracuje v běžném režimu samostatně bez přímého kontaktu s lidskou obsluhou.

### 3.3 Ruční navádění

Při tomto typu zabezpečení se robot stejně jako při bezpečnostním monitorovaném zastavení sám zastaví při vstupu obsluhy do pracovního prostoru. Obsluha je následně schopná kontrolo-

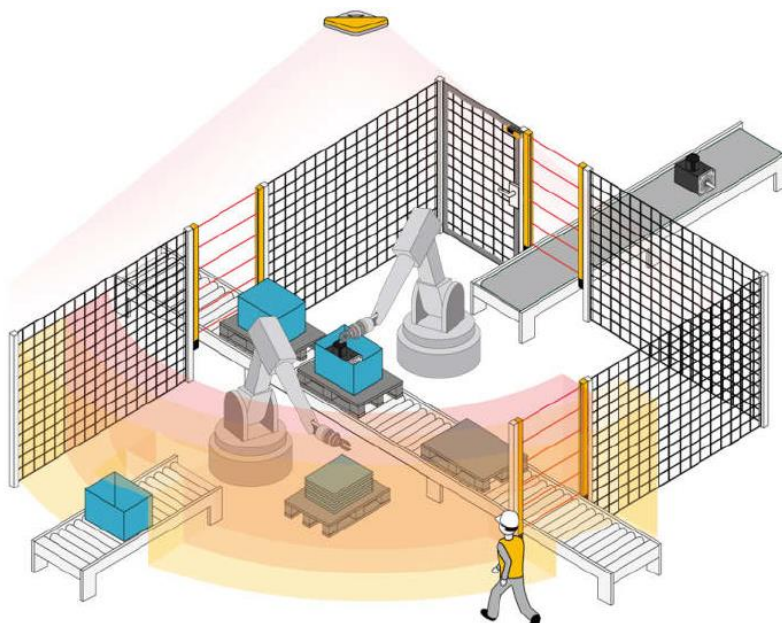
vat pohyb robotu přes povolovací tlačítko, jenž slouží k ručnímu navádění a také k programování pohybu učení [12]. Tento způsob se využívá stejně jako bezpečnostní monitorované zastavení více u samostatně pracujících robotů než u kolaborativních.



Obr. 3) Princip ručního navádění [11]

### 3.4 Sledování rychlosti a vzdálenosti

Tento způsob ochrany obsluhy se již na rozdíl od předešlých dvou hojně využívá u kolaborativních robotů, které většinu pracovního cyklu pracují v blízkosti člověka. Robot již nemusí být zabezpečen ochrannou klecí, nýbrž je opatřen několika čidly a lasery sledujícími rychlost pohybu a vzdálenost od obsluhy, popř. jiných překážek v pracovním prostoru robotu [11]. Při zaznamenání nebezpečí tedy vstupu obsluhy do pracovního prostoru nebo detekci překážky se robot zcela nezastaví, ale pouze zpomalí a teprve tehdy, pokud by mělo dojít ke kontaktu s obsluhou nebo překážkou se zastaví úplně [12].

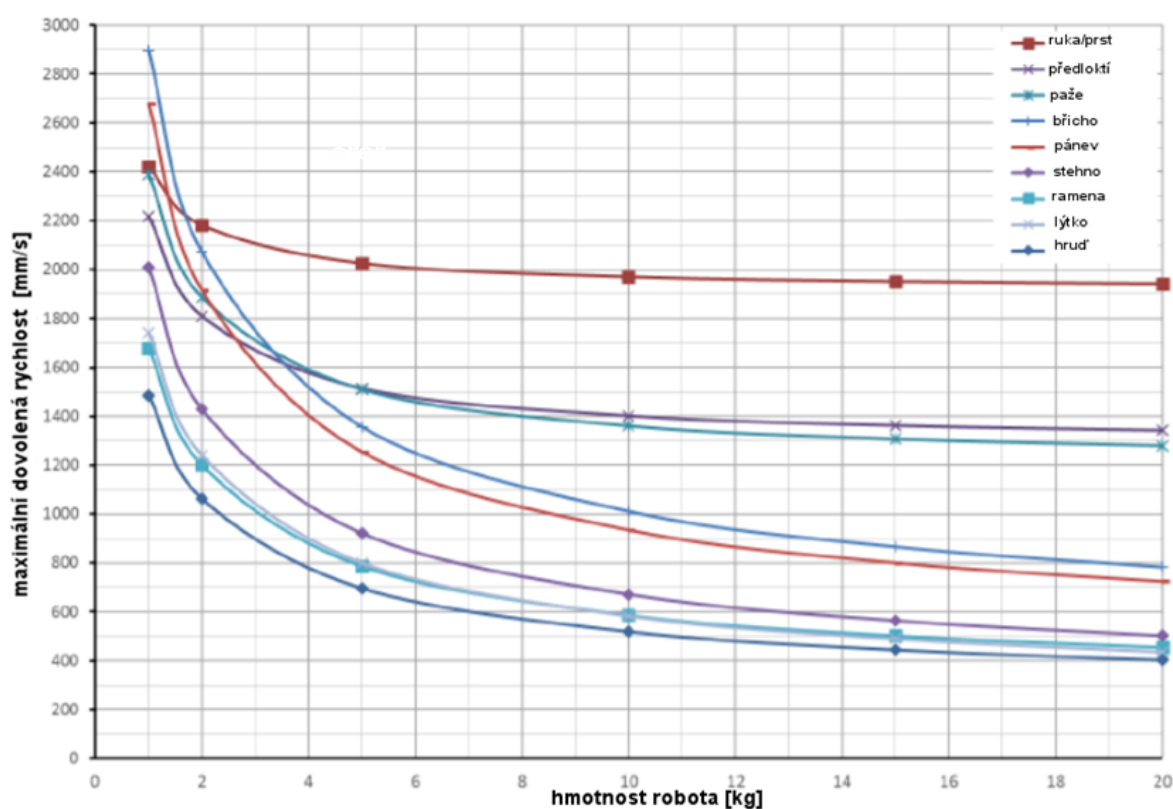


Obr. 4) Sledování rychlosti a vzdálenosti [13]



### 3.5 Omezení síly a výkonu

Omezení síly a výkonu umožňuje práci robotu bok po boku s člověkem, kterému je umožněno vstupovat do pracovního prostoru ať už cíleně či omylem. Tato funkce ochrany umožňuje celou řadu nových aplikací kolaborativních robotů, které vyžadují časté zásahy člověka do pracovního prostoru [14]. Tuto funkci upřesňuje technická specifikace ISO/TS 15066, ve které jsou přesně určeny dovolené síly a tlaky na jednotlivé části lidského těla, které kolaborativní robot při nárazu do člověka nesmí překročit [15]. Roboty využívající tento typ ochrany jsou navrhovány tak, aby v případě nárazu došlo k rozptýlení sil na širší povrch. Tento poznatek je jedním z důvodů, proč jsou ramena robotů především rotační, z měkkých materiálů a bez ostrých hran a rohů [11].



Obr. 5) Graf závislosti maximální přípustné rychlosti robotického ramena na hmotnosti robotu pro různé části těla [16]





## 4 PROGRAMOVÁNÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ

Jelikož robot nemá vlastní myšlení, musí se jeho činnosti předem naplánovat (naprogramovat). Každý program se skládá z jednotlivých příkazů, co má robot v danou chvíli udělat. Programování lze tedy definovat jako skládání jednotlivých příkazů do programu, kterým se robot následně řídí. Podle způsobu vytváření programu lze programování rozdělit na on-line a off-line [17].

### 4.1 On-line programování

Při on-line programování dochází k přímému kontaktu mezi operátorem a robotem. V první fázi operátor navádí robot postupně do jednotlivých bodů a robot si ukládá jejich pozici do řídicí paměti. V druhé fázi následuje programování koncového efektoru, popř. nástroje. Na konec je nutné určit trajektorii a rychlost robotu mezi jednotlivými body. Mezi nevýhody online programování patří nutnost zastavit provoz při tvorbě programu a časová a fyzická náročnost kladená na programátora při složitých operacích. Online programování lze dále rozdělit na metodu Teach-in a Play-back. [17]

#### 4.1.1 Metoda Teach-in

Při této metodě operátor robot učí jednotlivé body pomocí tlačítek na přenosném programovacím panelu (teach pendantu). V pozici, kterou je obsluha schopná nastavit velmi přesně, pak dojde k uložení údajů o daném bodě do paměti, následuje posun do dalšího bodu a celý cyklus se opakuje. Po uložení všech bodů programátor zvolí vhodnou křivku na proložení těchto bodů, po které se bude robot pohybovat. Hlavní výhodou této metody oproti metodě Play-back je právě přesnost určení jednotlivých bodů, možnou nevýhodou je nutnost nastavení přechodů mezi jednotlivými body. [18]

#### 4.1.2 Metoda Play-back

Metoda, která je vhodná spíše u operací nenáročných na přesnost pohybu jako je např. lakování, je založená na vedení ramena obsluhou po žádané dráze [17]. Robot si zapamatuje požadovaný pohyb ve formě tabulky bodů a následně při spuštění opakuje nahraný pohyb. Největší předností této metody je schopnost programování robotu i nekvalifikovanou obsluhou, která pouze vede robotické rameno a tím ho programuje. Hlavní nevýhodou jsou nepřesnosti, které jsou způsobeny nedokonalostí pohybu operátora při samotném učení [18].

### 4.2 Off-line programování

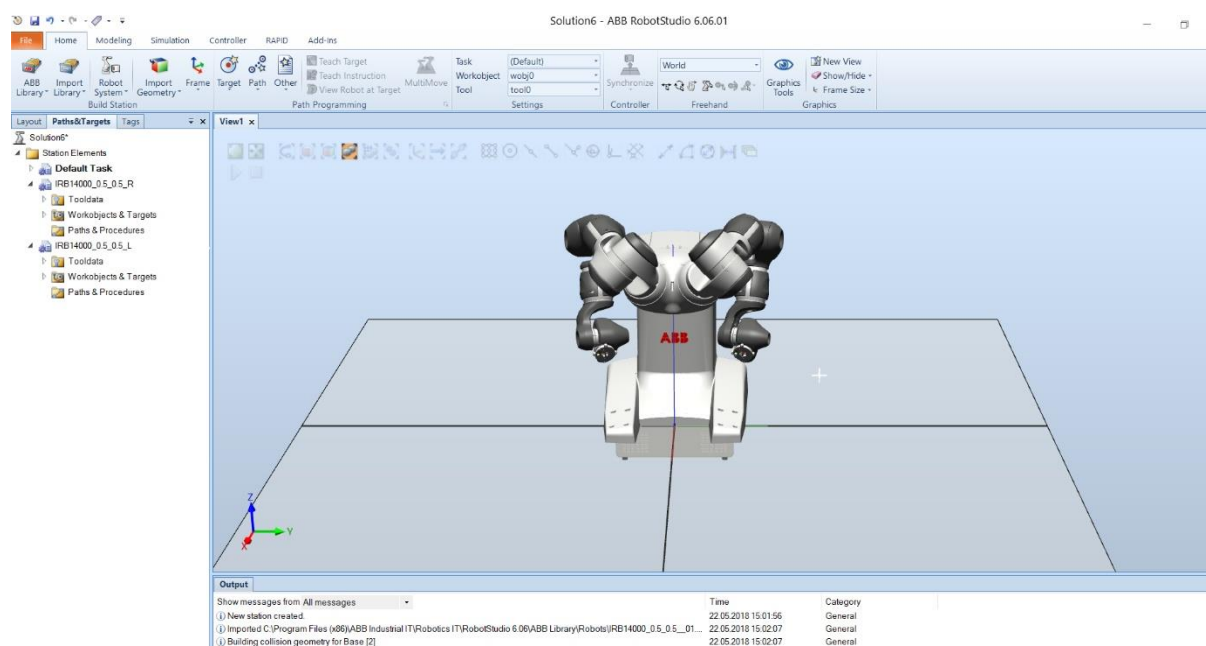
Druhou metodou programování robotů je metoda off-line programování. Při této metodě nedochází k bezprostřednímu kontaktu programátora s robotem, ale k přípravě programu v softwaru na počítači. Programátor namodeluje pracovní prostředí, které je vybaveno vybraným robotem,

řídícím systémem, popřípadě konkrétním efektozem a vytvoří pracovní cyklus, který je možno rovnou nasimulovat a optimalizovat na co nejkratší pracovní čas či dle jiného kritéria [17].

Největší předností off-line programování oproti on-line je možnost připravit program předem a vyhnout se tak odstavení pracovní linky z pracovního procesu. Naprogramování off-line umožňuje pomocí vizualizace v programovacím softwaru zkontrolovat kolizní stavy v plánovaném pohybu robotu a zamezit tak případnému poškození nebo zranění předem. Přesto je nutné po nahrání programu do řídicí jednotky zkontrolovat a často poupravit program dle skutečných požadavků.

Mezi další výhody patří: možnost virtuálního uspořádání budoucího pracoviště, zvolení správných nástrojů a parametrů technologického procesu, automatické vyhledávání trajektorie a vyhýbání se překážkám a otestování dosažitelnosti jednotlivých bodů, což má za následek větší efektivitu daného pracoviště [17].

Nevýhodou této metody je nutnost pořízení programovacího softwaru, který je většinou specifický pro danou značku robotu, a s tím související zvýšení nákladů. Mezi nejznámější programy patří RobotStudio, KukaSim, RobCad a další [17].



Obr. 6) Ukázka prostředí z programu RobotStudio

On-line i off-line programování má své výhody i nevýhody a kombinací těchto metod lze dosáhnout optimálního řešení pro naprogramování daného robotu.

## 5 PŘEHLED NEJZNÁMĚJŠÍCH KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ

V této kapitole budou představeny a následně porovnány nejznámější spolupracující roboty dle několika kritérií. Jelikož je výběr vhodného robota při navrhování pracoviště nesmírně důležitý hned z několika hledisek, může tato kapitola pomoci při pořizování nového kolaborativního robota do provozu.

### 5.1 Parametry průmyslových robotů

Každý průmyslový i kolaborativní robot má své parametry a před porovnáváním jednotlivých robotů mezi sebou je nutné je jasně definovat. Tyto parametry jsou jedním z hlavních hledisek při návrhu robotizovaného pracoviště. Základní parametry lze rozdělit dle [7] na:

- Užitečné zatížení

Užitečné zatížení je váha břemena, se kterou je daný robot schopen pracovat. Pokud je robot vybaven koncovým efektořem, je jeho užitečné zatížení nižší právě o hmotnost tohoto efektoře.

- Dosah

Dosah je nejčastěji definován jako maximální dosažitelná vzdálenost koncovým efektořem měřená od základny. Dosah je důležitý také z pohledu bezpečnosti tím, že vymezuje přibližnou pracovní oblast kolem robota.

- Bezpečnost

Dodržování bezpečnosti je jedním z hlavních aspektů při výběru kolaborativního robota. Všechny 4 módy kolaborace mezi člověkem a kolaborativním robotem byly uvedeny výše. Každý robot, který alespoň jeden způsob spolupráce splňuje obdrží certifikaci podle ISO 10218 nebo TS 15066. Tyto certifikace jsou jediným pravým důkazem bezpečnosti kolaborativního robota.

- Hmotnost

Hmotnost je jedním z vedlejších parametrů, který je důležitý hlavně při posuzování možnosti přenášet robot ručně popřípadě nosnosti podkladu pod plánovaným robotem.

- Složitost programování

Jak je zřejmé z kapitoly zabývající se programováním robotů, programovat lze několika způsoby od jednoduchého programování učením, které zvládne i málo kvalifikovaná obsluha, po složité programování ve speciálních programech, které vyžaduje kvalifikovaného programátora. Nicméně samotné programování vždy záleží na zručnosti daného člověka, a proto nelze jasně definovat stupně obtížnosti programování.

- Opakovatelnost a přesnost

Přesnost je definována jako schopnost robota přesunout se přesně do požadované polohy ve 3D prostoru. Opakovatelnost je schopnost vrátit se zpět na stejnou pozici.

## 5.2 YuMi

Kobot YuMi od společnosti ABB je první kolaborativní robot se dvěma pažemi, záměrně navržený tak, aby připomínal lidské protějšky. Název YuMi pochází ze spojení slov You and Me (ty a já). YuMi se využívá hlavně při montáži jednoduchých malých součástek, které musí být namontovány velmi přesně. Pevná konstrukce z hořčíkové slitiny pokrytá pružným plastovým pláštěm s měkkým polstrováním umožňuje absorbovat případné nečekané nárazy a zamezit tak větším zraněním obsluhy. Robot je naprogramován tak, aby v případě kontaktu dokázal zastavit svůj pohyb během několika milisekund. Mezi další výhody patří možnost pracovat v 7 osách, čímž v dnešní době disponuje pouze pár zástupců kolaborativních robotů. [19]

Tab. 2) Přehled základních parametrů robotu YuMi [20]

Počet pracovních os	7 každé rameno
Užitečné zatížení	0,5 kg
Hmotnost	38 kg
Opakovatelnost	+/- 0,02 mm
Dosah	500 mm
Přibližná cena	1.000.000 Kč
Hlavní použití	Montáž drobných součástek



Obr. 7) Kolaborativní robot YuMi [21]

## 5.3 Sawyer a Baxter

Robot Sawyer je již druhý kolaborativní robot od americké firmy Rethink Robotics. Oproti svému předchůdci Baxterovi váží pouze 19 kg a má téměř dvojnásobné užitečné zatížení. Právě kvůli menší konstrukci je možné nainstalovat Sawyera i do menších prostor. Hlavním znakem obou těchto robotů je display v horní části, který umožňuje určit aktuální stav robotu. Největší

předností Sawyera je vestavěný systém vidění, který umožňuje detekci překážek v širokém zorném poli. Sawyer je vybaven softwarem Intera, který umožňuje učení vedením a detekci kolize ještě před tím, než nastane [22].

Tab. 3) Přehled základních parametrů robotů Sawyer a Baxter [23] [24]

	Sawyer	Baxter
Počet pracovních os	7	7 každé rameno
Užitečné zatížení	4 kg	2,3 kg
Hmotnost	19 kg	75 kg
Opakovatelnost	+/- 0,1 mm	+/- 0,1 mm
Dosah	1260 mm	1210 mm
Přibližná cena	930.000 Kč	750 000 Kč
Hlavní použití	Skládání, paletizace	Balení, třídění

## 5.4 Universal Robots

Společnost Universal Robots nabízí celkem 3 typy kolaborativních robotů podle maximálního možného zatížení.

Nejmenším robotem je UR3 s ramenem o dosahu 500 mm, který již podle názvu může zvedat předměty o maximální hmotnosti 3 kilogramy. Větším typem je robot UR5, který disponuje dosahem 850 mm a maximálním zatížením 5 kg. UR5 byl zároveň vůbec prvním vyráběným kolaborativním robotem. Podle společnosti Universal Robots má UR5 vůbec nejrychlejší návratnost ze všech kolaborativních robotů. Největším zástupcem skupiny UR je UR10 o dosahu 1300 mm a s maximálním zatížením 10 kg.

Roboty společnosti Universal Robots nalézají díky široké škále provozních parametrů a velkému množství koncových efektorů uplatnění, kromě typických odvětví jako jsou automobilový průmysl nebo obrábění, také v oblasti zdravotnictví či zemědělství. Všechny tyto 3 roboty se snadno integrují do stávajících výrobních prostředí a díky jednoduchosti programování, při kterém lze využít ruční navádění, jsou schopny pracovat do několika hodin od montáže.

Tab. 4) Přehled základních parametrů robotů od Universal Robots [25]

	UR3	UR5	UR10
Počet pracovních os	6	6	6
Užitečné zatížení	3 kg	5 kg	10 kg
Hmotnost	11 kg	18,4 kg	28,9 kg
Opakovatelnost	+/- 0,1 mm	+/- 0,1 mm	+/- 0,1 mm
Dosah	500 mm	850 mm	1300 mm
Přibližná cena	700.000 Kč	880.000 Kč	1.130.000 Kč
Hlavní použití	Montáž, obrábění, balení, skládání, ...		

## 5.5 Roboty Kuka

Německá společnost Kuka je jedním z vedoucích výrobců z oblasti kolaborativní robotiky. Řada LBR iiwa se sestává ze dvou robotů rozdělených podle užitečného zatížení. Menší robot s označením LBR iiwa 7 R800 je vhodný pro manipulaci s menšími předměty do 7 kilogramů. Pro těžší předměty je vhodnější LBR iiwa 14 R820, který je schopen manipulovat s břemeny o váze až 14 kilogramů. [26]

Oba roboty jsou lehké díky své konstrukci z hliníku a jsou vhodné pro celou řadu aplikací jako například: měření, paletizace, balení, lepení, montáž, obrábění apod. O bezpečný chod bez kolizí a zranění obsluhy se stará několik vestavěných snímačů. Ke snížení následků při případné kolizi mají roboty Kuka zakulacený tvar bez ostrých hran.

Tab. 5) Přehled základních parametrů robotů od společnosti Kuka [26]

	LBR iiwa 7 R800	LBR iiwa 14 R820
Počet pracovních os	7	7
Užitečné zatížení	7 kg	14 kg
Hmotnost	22 kg	30 kg
Opakovatelnost	+/- 0,1 mm	+/- 0,15 mm
Dosah	800 mm	820 mm
Přibližná cena	1.750.000 Kč	
Hlavní použití	Měření, paletizace, montáž, lepení, balení, ...	

## 5.6 Aura

Robot je pokryt zvláštním typem povlaku z ochranné pěny, který mu umožňuje splňovat nejprísnejší bezpečnostní kritéria v případě kontaktu s člověkem [27]. Na bezpečnosti se dále podílí několik senzorů a čidel zabudovaných po celém robotu. Ze čtyř zmíněných způsobů kolaborace s člověkem využívá Aura sledování rychlosti a vzdálenosti, které umožňuje zastavení robotu bezprostředně před případným kontaktem. Díky své nosnosti (jedné z největších mezi koboty) je Aura využíván především v automobilovém průmyslu ke zvedání těžkých břemen a částí vozů. Nevýhodou je váha přes půl tuny, která znesnadňuje manipulaci s robotem.

Tab. 6) Přehled základních parametrů robotu Aura [28]

Počet pracovních os	6
Užitečné zatížení	110 kg
Hmotnost	685 kg
Opakovatelnost	+/- 0,07 mm
Dosah	2210 mm
Přibližná cena	2.000.000 Kč
Hlavní použití	Automobilový průmysl

## 5.7 Roboty Fanuc

Společnost Fanuc dodává celkem 3 kolaborativní roboty: CR-4iA, CR-7iA a CR-35iA.

Největší CR-35iA je i se svou nosností až 35 kilogramů z důvodu bezpečnosti schopen zastavit během několika milisekund. Jak je vidět na obr. 8, celý robot CR-35iA, stejně jako zbylé dva, je pokryt měkkým materiálem, který eliminuje ostré hrany a rohy, které by mohly způsobit zranění v případě střetu s člověkem. Konstrukce je navržena tak, aby nevznikala žádná místa, ve kterých by mohlo dojít ke skřípnutí nebo dokonce k amputaci prstu či končetiny. Všechny tři typy robotů jsou konstruovány tak, aby je bylo možné naprogramovat ručním vedením.

Tab. 7) Přehled základních parametrů robotů Fanuc [29]

	CR-4iA	CR-7iA	CR-35iA
Počet pracovních os	6	6	6
Užitečné zatížení	4 kg	7 kg	35 kg
Hmotnost	48 kg	53 kg	990 kg
Opakovatelnost	+/- 0,01 mm	+/- 0,01 mm	+/- 0,04 mm
Dosah	550 mm	717 mm	1813 mm
Přibližná cena	1 250 000 Kč	1 125 000 Kč	1 875 000 Kč
Hlavní použití	Automobilový průmysl, paletizace, práce na linkách, ...		



Obr. 8) Měkký kryt eliminující ostré hrany [29]



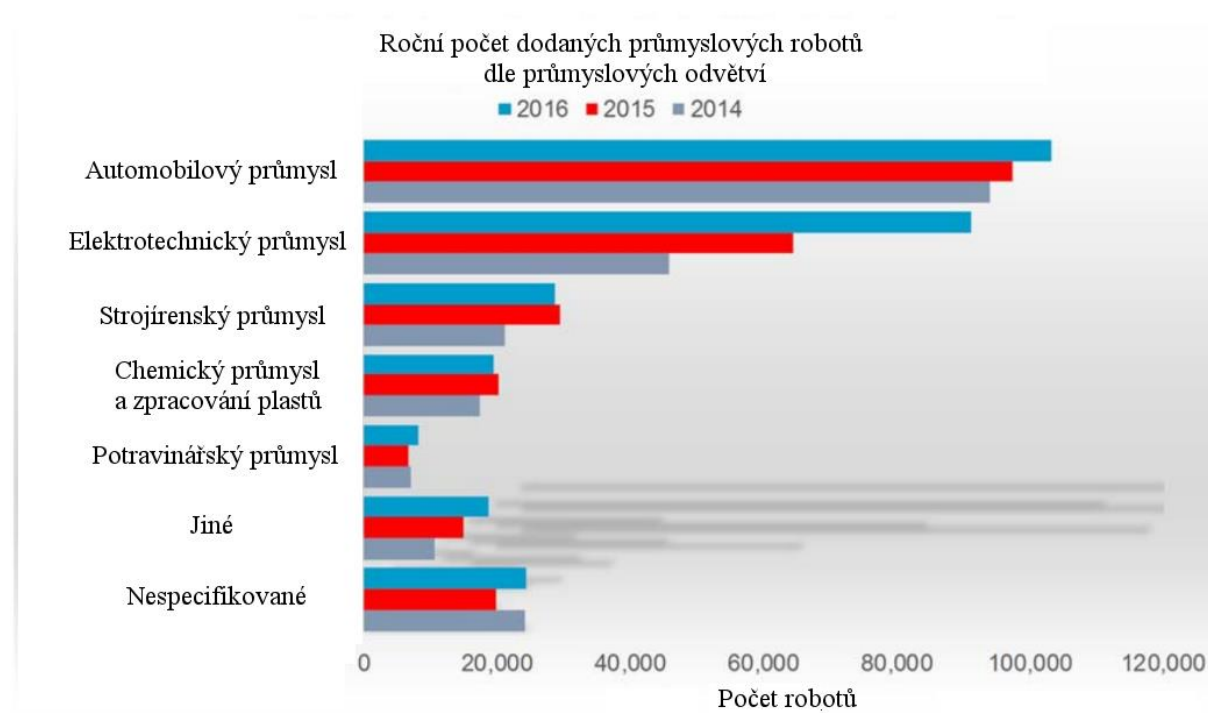


## 6 VYUŽITÍ KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ

Kolaborativní roboty se v dnešní době uplatňují v mnoha odvětvích. Dle dostupných statistik z roku 2017 od IFR (International Federation of Robotics) byly průmyslové roboty nejvíce dodávány v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. Počet dodaných robotů do jednotlivých odvětví lze vidět na obr. 9

V jednotlivých odvětvích lze rozdělit činnost podle mnoha aplikací: pick & place (uchopení a umístění předmětu), obsluha CNC strojů, balení a paletizace, kontrola kvality, montáž, leštění, šroubování, svařování a lepení, a další.

Některé kolaborativní roboty jako například roboty od společnosti Universal Robots jsou víceméně univerzální a lze je využít k většímu počtu aplikací. U většiny robotů je však hlavní oblast použití předurčena konstrukcí a parametry daného robotu. Hlavní oblast použití vybraných kolaborativních robotů je uvedena v tabulce u každého robotu v kapitole 5.



Obr. 9) Počet celosvětově dodaných robotů do jednotlivých odvětví [2]

Aplikace kolaborativních robotů lze rozdělit podle toho, která vlastnost se v dané aplikaci nejvíce uplatňuje na:

### 6.1 Uplatnění rychlosti

I přesto, že rychlost spolupracujících robotů nemůže z důvodu bezpečnosti dosahovat vysokých hodnot, je tato rychlost v určitých aplikacích vyšší, než jakou by byl schopen vykonávat člověk.

Z důvodu velkého počtu opakování jednotlivých kroků při obsluze strojů, především CNC obráběcích center, se s výhodou nasazují kolaborativní roboty, které jsou schopné pracovat bez pochybení výrazně delší dobu než člověk. V obvyklém případě je hlavním úkolem robotu, který je postavený v blízkosti obráběcího centra, umístit obrobek ze zásobníku do sklíčidla, zavřít ochranný kryt stroje, spustit program, vyčkat na dokončení obrábění, vyměnit obrobek za nový obrobek a celý proces opakovat [30].

V případě delšího času obrábění a pokud je robot vybaven vhodným efektem, lze robotu do pauzy při samotném obrábění naprogramovat další činnosti jako je např. uchopení dalšího obrobku. Nasazením spolupracujícího robotu se nejen zlepši pracovní časy (především výměny obrobku), ale také se sníží riziko zranění obsluhy, která by vykonávala monotónní práci [31].



Obr. 10) Obsluha strojů pomocí kolaborativního robotu [32]

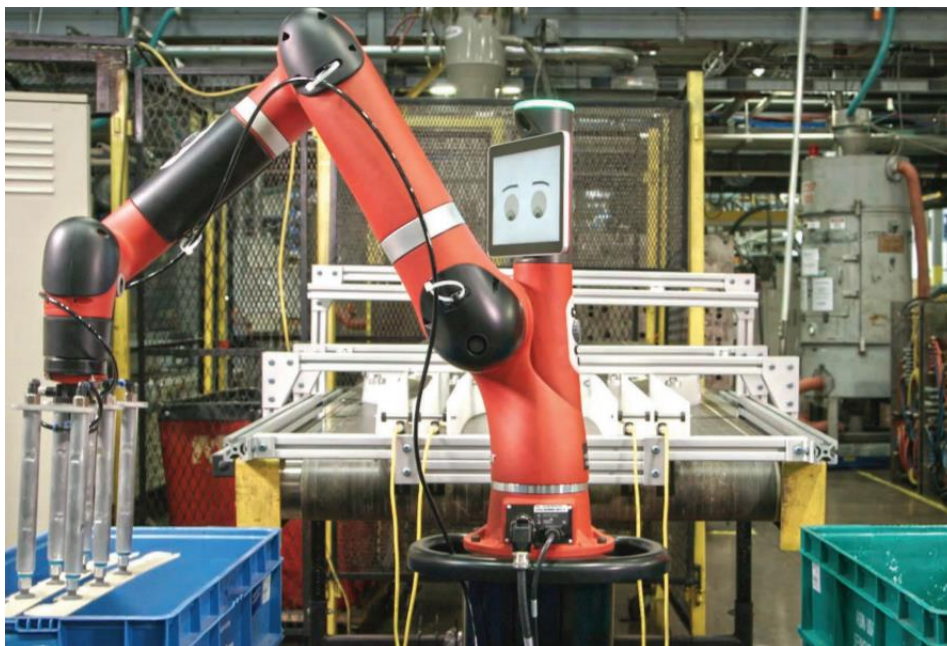
## 6.2 Uplatnění přesnosti a opakovatelnosti

Vysoká přesnost a opakovatelnost se uplatňuje především v oblasti pick & place, kontroly kvality, šroubování apod. Do kategorie „pick and place“ neboli „vzít a umístit“ patří všechny možné typy podávání či přesunu předmětů a jejich umístění na předem dané místo. Vysoká přesnost a opakovatelnost je u spolupracujících robotů oproti člověku zaručena i po několika počtech opakování pracovního cyklu. Nahrazením lidské síly se dosahuje vyšší flexibility a produktivity pracoviště. Další výhodou je oproštění člověka od monotónní činnosti. Z důvodu snadného přeprogramování některých kolaborativních robotů je případná změna výrobního procesu velmi rychlá, a proto lze tyto roboty nasadit i v malosériové produkci.

## 6.3 Uplatnění užitečného zatížení

Poměrně velké užitečné zatížení (až 110 kg) ve srovnání s člověkem je příčinou nasazování kolaborativních robotů v oblasti balení a paletizace. Další výhodou nahrazení člověka robotem

v oblasti balení a paletizace je schopnost robotu pracovat nepřetržitě 24 hodin denně. Tato práce je pro člověka také často stereotypní a ergonomicky nepříznivá.



Obr. 11) Robot Sawyer při paletizaci zboží [33]

#### 6.4 Uplatnění specifické síly

Jelikož jsou roboty řízené programem, lze naprogramovat specifickou sílu, kterou mají vyvinout v případě kontaktu s předmětem. Nejmodernější koboty jsou vybaveny funkcí automatického nastavení polohy pro dosažení požadované síly [34]. Těto funkce se využívá především u leštění, kde je nutné na povrch působit velmi precizní silou. Robot je následně schopen dokonale vyleštit i nerovnoměrné a zakřivené povrchy.

#### 6.5 Uplatnění více předností

U předešlých aplikací bylo alespoň částečně možné vyzdvihnout jednu přednost. Každé nasazení koboty má však více kladů i záporů. Mezi aplikace, kde lze nalézt více předností patří například svařování a lepení.

V oblasti svařování a lepení se roboty nasazují především z důvodu: minimalizace přestávek ve výrobě a snížení odpadního materiálu. Dalším pozitivem může být omezení pobytu člověka v nebezpečném prostředí a větší fyzická výdrž robotu.



## 7 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Cílem této případové studie je ukázat způsob programování kolaborativního robota na jednoduchém příkladu. Úkolem bylo vybrat vhodného kolaborativního robota pro sestavení sestavy ze 2 jednoduchých dílů, naprogramování dané operace a následná ukázka hotového programu. Prvním dílem (objektem) je plastová deska o rozměrech 20×100×150 mm s otvorem, do kterého má být zasazen čep o rozměrech Ø20×120 mm.

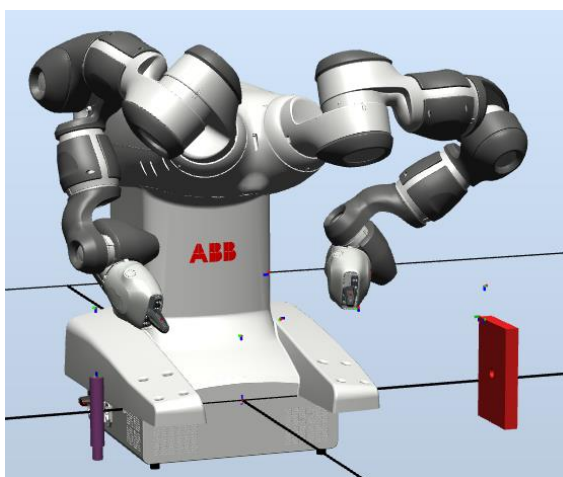
### 7.1 Výběr vhodného robota

Při volbě vhodného robota lze využít kapitolu č. 5 této práce, ve které jsou představeny nejznámější kolaborativní roboty. Jelikož robot bude pracovat s malým zatížením a z důvodu velké přesnosti a možnosti pracovat se dvěma rameny je jedním z nejvhodnějších robotů robot YuMi od ABB. Dalším důvodem pro výběr tohoto robota je volně dostupný software RobotStudio, který velice usnadňuje off-line programování a umožňuje simulaci daného procesu ještě před implementací do výrobní linky.

### 7.2 Tvorba pracoviště

Prvním krokem při vytváření programu v RobotStudios 6.06 je namodelování budoucího pracoviště což obnáší import robota, osazení ramen vhodnými efekty, přidání řídicí jednotky a namodelování pracovních objektů, v tomto případě čepu a desky, se kterými bude robot pohybovat.

Při importu robota a efektorů lze s výhodou využít knihovnu od ABB, která je součástí softwaru. Virtuální řídicí jednotka (**Robot System<sup>1</sup>**) je také součástí softwaru a přidá se snadno dle vybraného robota. Modelování jednoduchých objektů lze provést přímo v RobotStudios, pro složitější lze využít import z jiných programů jako například Autodesk Inventor.



Obr. 12) Vizualizace pracoviště

<sup>1</sup> Z důvodu absence češtiny v RobotStudios jsou tučně uvedeny i názvy vyskytující se v softwaru

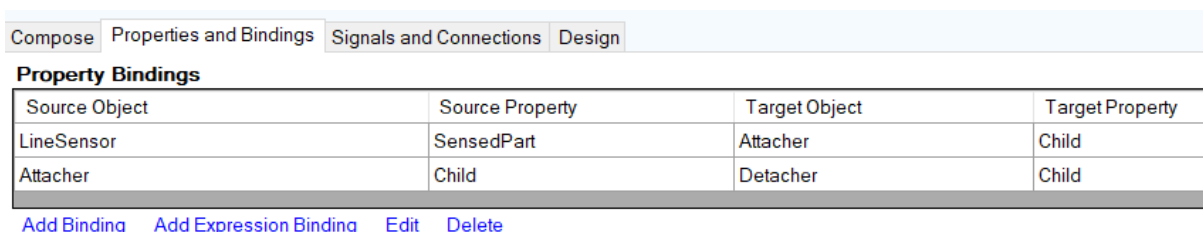


### 7.3 Přizpůsobení koncového efektoru

Koncový efektor je zařízení na konci robotického ramene, které umožňuje manipulovat, či jinak pracovat s předměty. V tomto případě se jedná o efektor z knihovny ABB pod názvem **Smart Gripper**. Tento efektor lze nainportovat v několika provedeních: s jednou nebo dvěma vakuovými přísavkami, s prsty či s kamerou. Pro zadaný úkol a pracovní objekty je nejvhodnější použít chapadlo se dvěma prsty. Robot je pro danou úlohu vybaven jedním efektozem na každém rameni. Jelikož je nastavení obou efektorů stejné, je v následujících podkapitolách zobrazeno pouze pro levé rameno.

Obyčejný efektor lze rozšířit o další možnosti vytvořením tzv. inteligentní součásti (**Smart Component** dále jen SC). V nastavení této SC lze, a pro tento typ úlohy je nutné, přidat několik virtuálních členů, které umožňují správný chod simulace:

- **LineSensor** detekuje objekt a umožňuje tak zjistit, zda mají prsty pokračovat ve svírání nebo jestli je již objekt chycen, pro správný chod je nutné nastavit vazby (obr. 13)
- **Attacher** a **Detacher** představují čistě virtuální členy, které umožňují správný chod simulace a zajišťují vazbu mezi prsty efektoru a objektem
- **JointMover** řídí lineární pohyb prstů při svírání či otevírání
- a další logické prvky, které zpracovávají signály

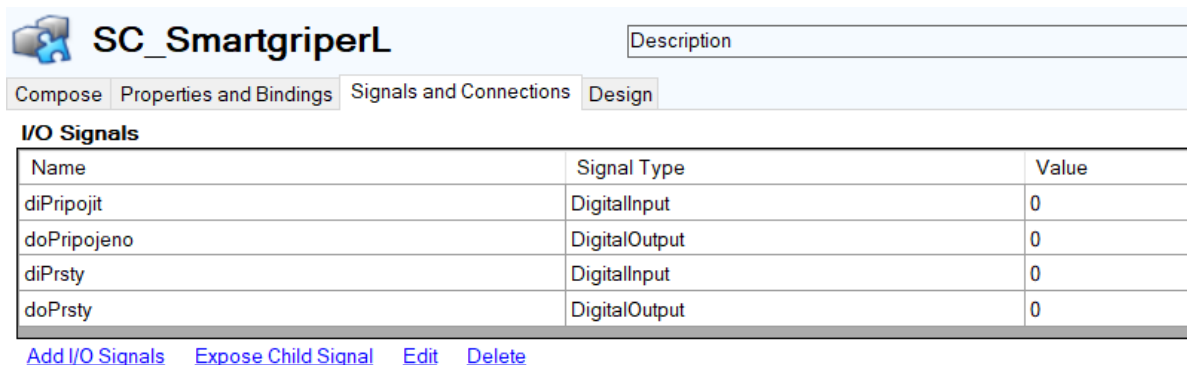


Source Object	Source Property	Target Object	Target Property
LineSensor	SensedPart	Attacher	Child
Attacher	Child	Detacher	Child

Obr. 13) Nastavení vazeb

### 7.4 Nastavení SC

Všechny SC z předchozí podkapitoly je nutné správně nastavit a zajistit jejich správný chod pomocí vhodných binárních signálů (obr. 14).



Name	Signal Type	Value
diPripojit	DigitalInput	0
doPripojeno	DigitalOutput	0
diPrsty	DigitalInput	0
doPrsty	DigitalOutput	0

Obr. 14) Nastavení signálů SC

V nastavení SC je nutné také nastavit jednotlivé připojení neboli co se má stát po změně signálu (obr. 15).

#### I/O Connections

Source Object	Source Signal	Target Object	Target Signal
SC_SmartgriperL	diPripojit	LineSensor	Active
LineSensor	SensorOut	Attacher	Execute
SC_SmartgriperL	diPripojit	LogicGate [NOT]	InputA
LogicGate [NOT]	Output	Detacher	Execute
Attacher	Executed	LogicSRLatchPripojeniSignal	Set
Detacher	Executed	LogicSRLatchPripojeniSignal	Reset
LogicSRLatchPripojeniSignal	Output	SC_SmartgriperL	doPripojeno
SC_SmartgriperL	diPrsty	JointMoverOtevreno	Execute
SC_SmartgriperL	diPrsty	LogicGate_2 [NOT]	InputA
LogicGate_2 [NOT]	Output	JointMoverZavreno	Execute
LineSensor	SensorOut	JointMoverZavreno	Cancel
JointMoverOtevreno	Executed	LogicSRLatchPrstySignal	Set
JointMoverZavreno	Executed	LogicSRLatchPrstySignal	Reset
LogicSRLatchPrstySignal	Output	SC_SmartgriperL	doPrsty

[Add I/O Connection](#) [Edit](#) [Manage I/O Connections](#) [Delete](#)

Obr. 15) Nastavení připojení SC

## 7.5 Tvorba signálů v řídicím systému

Dalším krokem důležitým pro správný chod simulace je vytvoření a nahrání signálů do řídicího systému (**I/O System**). Jedná se o signály **Digital Input** (di) a **Digital Output** (do), které jsou pro lepší orientaci rozlišeny písmeny L (levé rameno) a R (pravé rameno). Po vytvoření všech důležitých signálů je potřeba restartovat celý řídicí systém příkazem **Restart (Warmstart)**.

Configuration - I/O System x							
Type	Name	Type of Signal	Assigned	Signal Identification Label	Device	C	Access Level
Access Level	custom_DO_0	Digital Output	D652_10		0		Default
Cross Connection	custom_DO_1	Digital Output	D652_10		1		Default
Device Trust Level	custom_DO_2	Digital Output	D652_10		2		Default
DeviceNet Command	custom_DO_3	Digital Output	D652_10		3		Default
DeviceNet Device	custom_DO_4	Digital Output	D652_10		4		Default
DeviceNet Internal Device	custom_DO_5	Digital Output	D652_10		5		Default
EtherNet/IP Command	custom_DO_6	Digital Output	D652_10		6		Default
EtherNet/IP Device	custom_DO_7	Digital Output	D652_10		7		Default
EtherNet/IP Internal Device	diAttached_R	Digital Input		Objekt pripojen 1 odpojen 0	N/A		All
Industrial Network	diFingers_R	Digital Input		Prsty otevreny 1 zavreny 0	N/A		All
Route	diPripojeni_L	Digital Input		Objekt pripojen 1 odpojen 0	N/A		All
Signal	diPrsty_L	Digital Input		Prsty otevreny 1 zavreny 0	N/A		All
Signal Safe Level	doAttach_R	Digital Output		Pripojeno 1 odpojeno 0	N/A		All
System Input	doFingers_R	Digital Output		Otevreny 1 zavreny 0 prsty	N/A		All
System Output	doPripojeni_L	Digital Output		Pripojeno 1 odpojeno 0	N/A		All
	doPrsty_L	Digital Output		Otevreny 1 zavreny 0 prsty	N/A		All
	DRV1BRAKE	Digital Output	DRV_1	Brake-release coil	2	sa	ReadOnly
	DRV1BRAKEFB	Digital Input	DRV_1	Brake Feedback (Y3-6) at Car	11	est	ReadOnly

Obr. 16) Signály v řídicím systému

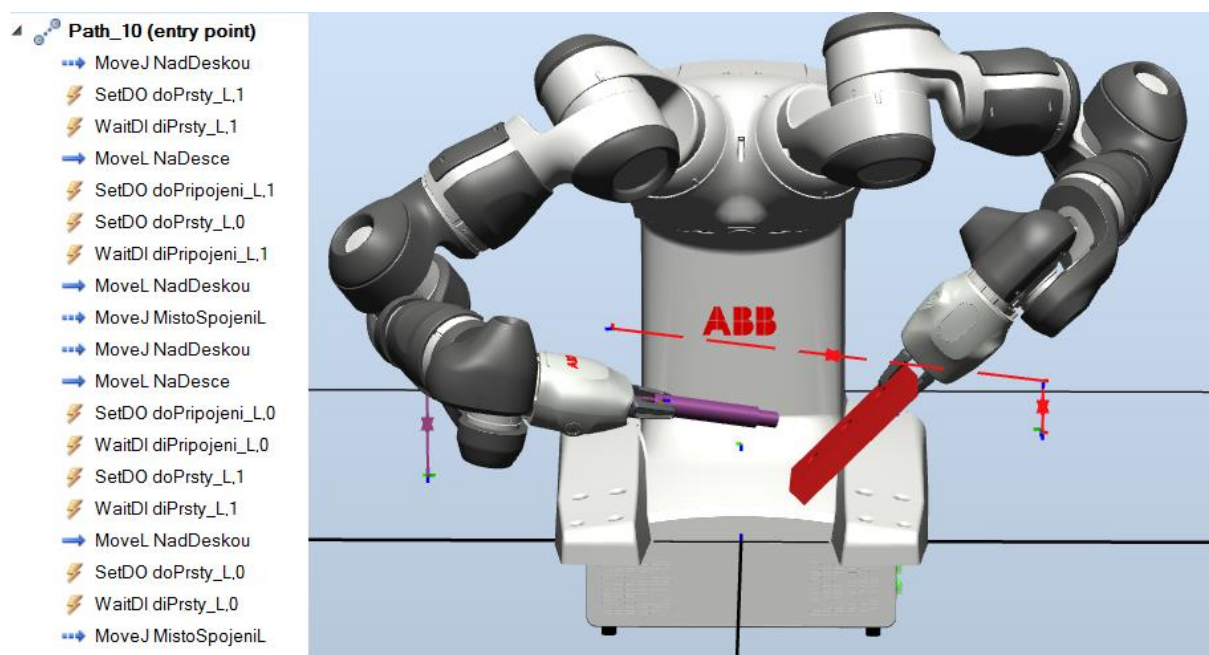
## 7.6 Tvorba pracovních cest

Výsledný pohyb robotu se bude skládat z pohybů po trajektoriích mezi jednotlivými pracovními body (**Target**). Učení bodů se provádí pomocí příkazu **Teach Target** a je důležité nastavit správnou orientaci robotického ramena při dosažení těchto bodů.

Po vytvoření všech potřebných pracovních bodů se z bodů vytvoří tzv. cesta (**Path**). V parametrech této cesty lze nastavit nejdůležitější vlastnosti pohybu mezi jednotlivými body jako je např. rychlost (**Speed**) a přesnost najetí do daného bodu (**Zone**). Dalším důležitým parametrem je způsob přesunu (**Motion Type**), který určuje, jestli bude pohyb mezi jednotlivými body lineární (**Linear**) nebo po křivce (**Joint**). Příkazem **Move Along Path** lze zkontrolovat, zda při pohybu po dané trajektorii nedojde k nechtěnému kontaktu mezi jednotlivými rameny či ke kontaktu robotu s jinou překážkou.

Po dokončení cesty lze mezi jednotlivé body trajektorie vložit příkazy (**Insert Action Instruction**), které budou zpracovávat signály vytvořené v předešlé kapitole. Jedná se o příkazy:

- **SetDo** způsobující změnu hodnoty vstupního signálu
- **WaitDi**, který slouží k čekání, než je nastaven vstupní signál předchozím příkazem



Obr. 17) Vytvořené cesty s přidávanými příkazy

## 7.7 Vytvoření simulace

Pro vytvoření výsledné simulace je třeba nahrát vybranou cestu do RAPIDu (**Synchronize to RAPID**), ve které dojde k jejímu převedení do programovacího jazyka robotu. Po dokončení synchronizace a nastavení signálů mezi řídicí jednotkou a jednotlivými rameny (obr. 18) lze již



hotovou simulaci spustit. V nastavení simulace (**Simulation Setup**) je možné zvolit přehrání simulace pohybu obou či pouze jednoho ramena.

Station Logic x			
Compose	Properties and Bindings	Signals and Connections	Design
<b>I/O Connections</b>			
Source Object	Source Signal	Target Object	Target Signal
System1	doFingers_R	SC_SmartgriperR	diFingers
System1	doAttach_R	SC_SmartgriperR	diAttach
SC_SmartgriperR	doFingers	System1	diFingers_R
SC_SmartgriperR	doAttached	System1	diAttached_R
System1	doPrsty_L	SC_SmartgriperL	diPrsty
System1	doPripojeni_L	SC_SmartgriperL	diPripojit
SC_SmartgriperL	doPrsty	System1	diPrsty_L
SC_SmartgriperL	doPripojeno	System1	diPripojeni_L

[Add I/O Connection](#)
[Edit](#)
[Manage I/O Connections](#)
[Delete](#)

Obr. 18) Nastavení signálů mezi řídicí jednotkou a rameny



## 8 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá tématem kolaborativní roboty, které je v dnešní době velice aktuální. Tato technologie nachází čím dál větší uplatnění v praxi. Využití těchto robotů přináší řadu výhod, ale každá firma musí zvážit vedle těchto pozitiv i negativa a případná rizika, která mohou při používání spolupracujícího robotu nastat.

Teoretická část bakalářské práce byla věnována seznámení s problematikou spolupracujících robotů. V úvodu byla představena jejich stručná historie, rozdíly mezi obyčejnými a kolaborativními průmyslovými roboty, jejich bezpečnost, programování a uplatnění v praxi. Jelikož je bezpečnost při práci jedním z nejdůležitějších kritérií při implementaci robotu do výroby, byla ji věnována podstatná část této práce. Představeny byly také 4 módy spolupráce mezi člověkem a kolaborativním robotem a norma ISO/TS 15066, která je jedním ze základních dokumentů týkajících se bezpečnosti v oblasti kolaborativní robotiky. Splnění bezpečnostních kritérií při konstrukci robota dle uvedené normy ovšem automaticky neznamená bezpečnost celého pracoviště, tudíž jen nutno bezpečnost pracoviště posuzovat zvlášť. V další části byly zmíněny způsoby programování kolaborativních robotů. Tyto roboty oproti obyčejným průmyslovým lze programovat pomocí řady metod uvedených v samostatné kapitole, kterou lze považovat za úvod do případové studie. Na závěr teoretické části byly představeny nejznámější kolaborativní roboty, jejich důležité parametry a možnosti jejich nasazení v praxi. Ze zmíněného přehledu byl vybrán vhodný robot pro případovou studii v praktické části bakalářské práce.

V praktické části byl na jednoduchém příkladu prezentován způsob naprogramování kolaborativního robotu. Dle zadání byl vybrán jako nejvhodnější robot YuMi od ABB, který byl následně importován do programu RobotStudio od stejné firmy. Robot byl vybaven koncovými efektory a řídicí jednotkou, která umožňuje správný chod při simulaci výsledného programu. Výsledkem této studie je simulace pracovního procesu při sestavování výrobku ze dvou dílů.



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
- [2] Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots. In: *International Federation of Robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [www.ifr.org/downloads/press/Executive\\_Summary\\_WR\\_2017\\_Industrial\\_Robots.pdf](http://www.ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf)
- [3] Roboty a robotická zařízení. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] LAWTON, Jim. Collaborative ROBOTS. InTech [online]. Durham: International Society of Automation, 2016, 63(5), 12-14 [cit. 2018-04-16]. ISSN 0192303X. Dostupné z: <https://www.isa.org/intech/20161001/>
- [5] What Are The Main Types Of Robots?. In: *RobotWorx* [online]. Marion: RobotWorx, b.r. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.robots.com/faq/what-are-the-main-types-of-robots>
- [6] Robotic applications in industrial environments are better established. In: *Eureka Magazine* [online]. b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [http://www.eurekamagazine.co.uk/article-images/143300/Fig%201.%20roboticarms\\_popup.jpg](http://www.eurekamagazine.co.uk/article-images/143300/Fig%201.%20roboticarms_popup.jpg)
- [7] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. *Cobots Ebook* [online]. 7th Edition Update. Levis, 2017 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook>
- [8] DJURIC, Ana, R.J. URBANIC a J.L. RICKLI. A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* [online]. 2016, 9(2), 458 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.4271/2016-01-0337. ISSN 1946-3987. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2016-01-0337/>
- [9] BARTOŠÍK, Petr. Bezpečnost kolaborativních robotů. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Děčín, 2017, 2017(8), 74-76 [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezpecnost-kolaborativnich-robotu-2017\\_08\\_0\\_11040/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezpecnost-kolaborativnich-robotu-2017_08_0_11040/)
- [10] DAVID, Pradeep. New Safety Certifications To Standardise Collaborative Robots. *Auto Tech Review* [online]. New Delhi: Springer India, 2016, 5(4), 14-15 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1365/s40112-016-1115-x. ISSN 2250-3390. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1365/s40112-016-1115-x>

- [11] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. What Does Collaborative Robot Mean ?. In: *Robotiq* [online]. Levis, 2015 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>
- [12] BARTOŠÍK, Petr. Nové přístupy k bezpečnosti robotů. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Děčín, 2016, 2016(6), 22-23.
- [13] ANANDAN, Tanya, ed. The Shrinking Footprint of Robot Safety. In: *Robotic Industries Association* [online]. Michigan: Robotic Industries Association, 2014 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/The-Shrinking-Footprint-of-Robot-Safety/content\\_id/5059](https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/The-Shrinking-Footprint-of-Robot-Safety/content_id/5059)
- [14] KAPOOR, Chetan. ROBOTS AND HUMANS-LET THE COLLABORATION BEGIN. *NASA Tech Briefs* [online]. 2016, 40(4) [cit. 2018-04-16]. ISSN 0145-319X, 0145-319X. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1808098875?accountid=17115>
- [15] HAVLE, Otto. Kolaborativní robotika: Dočasná móda, nebo trvalý trend?. *Control Engineering Česko* [online]. Český Těšín: Trade Media International, s. r. o., 2017, 2017(2) [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/kolaborativni-robotika-docasna-moda-nebo-trvaly-trend/>
- [16] Collaborative Robot Technical Specification ISO/TS 15066 Update. In: *University of Minnesota* [online]. Minnesota: University of Minnesota, 2016 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://me.umn.edu/courses/me5286/robotlab/Resources/12-TR15066Overview-SafetyforCollaborativeApplications-RobertaNelsonShea.pdf>
- [17] Príručka: Automatizačná a robotická technika. In: *Strojnícka fakulta TUKE* [online]. Košice: Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2011 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka\\_sk\\_final.pdf](http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_sk_final.pdf)
- [18] Automatizace a robotizace I. In: *SPS-KO* [online]. b.r. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [http://www.sps-ko.cz/documents/ARO\\_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/ARO_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf)
- [19] CROWTHER, Phil. Collaborative Robots Transform Traditional Assembly. *NASA Tech Briefs* [online]. 2015, 39(9), 14-14 [cit. 2018-04-16]. ISSN 0145-319X. Dostupné z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/articles/22894>
- [20] YuMi – společně tvoříme budoucnost automatizace You and Me. In: *ABB Group* [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/5662b754739545899518eea9ea7e3781/yumi\\_datasheet\\_cz.pdf](https://library.e.abb.com/public/5662b754739545899518eea9ea7e3781/yumi_datasheet_cz.pdf)
- [21] Kolaborativní robot YuMi. In: *Abb.com* [online]. b.r. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www07.abb.com/images/librariesprovider89/default-album/robots/yumi/d34r4217.jpg?sfvrsn=1>

- [22] New Source & Capabilities For Collaborative Robots. *Plastics Technology* [online]. 2018, 64(1), 75-75 [cit. 2018-04-16]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=126968345&lang=cs&site=ehost-live>
- [23] Baxter Collaborative Robot Tech Specs. In: *Rethink robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [www.rethinkrobotics.com/baxter/tech-specs/](http://www.rethinkrobotics.com/baxter/tech-specs/)
- [24] Sawyer Collaborative Robot Tech Specs. In: *Rethink Robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.rethinkrobotics.com/sawyer/tech-specs/>
- [25] UNIVERSAL ROBOTS | UR3, UR5, UR10. In: *Cobots guide* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://cobotsguide.com/2016/06/universal-robots/>
- [26] LBR iiwa. In: *Kuka Robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/lbr%C2%A0iiwa>
- [27] AURA: A real, sensitive robot. In: *Comau Robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.comau.com/EN/media/news/2016/06/aura>
- [28] Comau Introduces Two New Products To North American Market. In: *Workfloor: Robotics News for the Factory* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/comau-introduces-two-new-products-to-north-american-market>
- [29] CR series: Powerful collaborative robots for a wide range of applications. In: *Fanuc.eu* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/brochures/collaborative-robot-brochure-de/collaborative-robot-brochure-en.pdf?la=cs>
- [30] How to do Machine Tending Using Collaborative Robots. In: *Workfloor: Robotics News for the Factory* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/how-to-do-machine-tending-using-collaborative-robots>
- [31] Improve CNC Machine Cycle Time, Achieve Higher Throughput. In: *Rethink robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.rethinkrobotics.com/wp-content/uploads/2016/06/Application-Datasheet-CNC-Mar-16-1.pdf>
- [32] Trelleborg sealing solutions. In: *Universal Robots* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/case-stories/trelleborg-sealing-solutions/>
- [33] Automate repetitive packaging tasks. In: *Rethink robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [http://www.rethinkrobotics.com/wp-content/uploads/2017/05/PACKAGING-DATASHEET-PDF\\_0517.pdf](http://www.rethinkrobotics.com/wp-content/uploads/2017/05/PACKAGING-DATASHEET-PDF_0517.pdf)
- [34] Spolupráce operátorů a robotů v procesu leštění. In: *Universal Robots* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/aplikace/le%C5%A1t%C4%9Bn%C3%AD/>





## 10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

### 10.1 Seznam obrázků

Obr. 1)	Počet celosvětově prodaných průmyslových robotů .....	17
Obr. 2)	Průmyslový robot v ochranné kleci .....	18
Obr. 3)	Princip ručního navádění .....	22
Obr. 4)	Sledování rychlosti a vzdálenosti .....	22
Obr. 5)	Graf závislosti maximální přípustné rychlosti robotického ramena na hmotnosti robotu pro různé části těla .....	23
Obr. 6)	Ukázka prostředí z programu RobotStudio .....	26
Obr. 7)	Kolaborativní robot YuMi .....	28
Obr. 8)	Měkký kryt eliminující ostré hrany .....	31
Obr. 9)	Počet celosvětově dodaných robotů do jednotlivých odvětví .....	33
Obr. 10)	Obsluha strojů pomocí kolaborativního robotu .....	34
Obr. 11)	Robot Sawyer při paletizaci zboží .....	35
Obr. 12)	Vizualizace pracoviště .....	37
Obr. 13)	Nastavení vazeb .....	38
Obr. 14)	Nastavení signálů SC .....	38
Obr. 15)	Nastavení připojení SC .....	39
Obr. 16)	Signály v řídicím systému .....	39
Obr. 17)	Vytvořené cesty s přidávanými příkazy .....	40
Obr. 18)	Nastavení signálů mezi řídicí jednotkou a rameny .....	41

### 10.2 Seznam tabulek

Tab. 1)	Porovnání tradičního průmyslového a spolupracujícího robotu .....	19
Tab. 2)	Přehled základních parametrů robotu YuMi .....	28
Tab. 3)	Přehled základních parametrů robotu Sawyer .....	29
Tab. 4)	Přehled základních parametrů robotů od Universal Robots .....	29
Tab. 5)	Přehled základních parametrů robotů od společnosti Kuka .....	30
Tab. 6)	Přehled základních parametrů robotu Aura .....	30
Tab. 7)	Přehled základních parametrů robotů Fanuc .....	31